大型水轮发电机组定子接地故障分析研究

随着水电装机容量的增加，发电机机端电压也随之大幅增加，机端电压的增高对定子线棒、测温元件等部件的绝缘提出了更高的要求，研究大型水轮发电机组定子绕组中测温元件的结构、布置等因素对发电机组的安全运行有重要意义。某水电站大型水轮发电机组（722.2 MV·A）C相定子绕组接地保护突然发生动作，停机检查发现定子绕组发生一点接地故障，经多次分析并抽转子、拔线棒等检查最终原因如下：测温垫条在装配时测温元件引线未加装外层绝缘保护套，引线屏蔽铜网与线棒在交变磁场下，感应电动势导致屏蔽线通过线棒表面绝缘低阻层接地，并与外部测温电阻屏蔽线短接接地形成回路产生环流，该环流在接触点（线棒表面绝缘低阻层）处产生热量，最终使封装层碳化和线棒绝缘层受热加速老化，绝缘强度降低，引发线棒绝缘破压，造成定子绕组接地故障。

高宗宝[1] 吴广宁[2] 江建明[1] 黎宏飞[1]/1.国电科学技术研究院 2.西南交通大学电气工程学院

高宗宝/工程师

关键词/Keywords
水轮发电机·
一点接地·
测温元件·
定子绕组·

0 引言

测温元件在发电机中起着至关重要的作用，可以通过测温元件得知发电机定子绕组的温度，从而判断定子绕组是否故障及定子绕组的老化程度。近年来火电机组发生测温元件引起定子接地故障的事件屡有发生，如内蒙古国华准电4F发电机测温元件发热引起发电机发生接地故障[1]、准格尔某电厂因测温元件故障导致发电机线棒绝缘烧损等[2]。

近年来，随着我国水电装机容量的不断增长，出现了溪洛渡、向家坝、锦屏、官地和大岗山等一大批大型水电站，这些大型水电站的单机装机容量均达到600 MV·A以上，甚至更高。随着装机容量的增加，发电机机端电压也随之增加至18～22 kV（和火电机组相等），机端电压的增高对定子线棒、测温元件等绝缘提出了更高的要求，同时，随着机端电压的升高势必会在一些悬浮器件（如测温元件、屏蔽层等）上产生更高的感应电压，感应电压一旦构成回路则会产生环流，引起发热，严重时会导致定子绕组发生接地故障。因此，研究大型水轮发电机组定子绕组中测温元件的结构、布置及材质等因素对发电机组的安全运行有重要意义。

1 发电机概况

某大型水电站共安装4台混流式水轮发电机组，单机额定容量为722.3 MV·A，额定电压为18 kV，额定电流为23 165.3 A，Y形接线，每相8分支，每分支24槽，共576槽。4F机组于2016年8月29日首次并网。

垫条情况简介：长3 340 mm，宽23 mm，高5 mm。测温电阻安装在垫条内部，有布置在垫条上部、中部和下部三种方式。在垫条上开槽，将测温电阻嵌入槽中再灌胶封装、打磨。

2 故障现象

2016年12月5日5：47，4F机组定子接地保护动作。停机后发现C相绝缘电阻为0 MΩ，并通过电压法测试判定178槽下层线棒击穿。12月9日，拆除第178槽上层线棒，随后拔出层间测温垫条。检查发现上层线棒槽部直线部位存在2处过热烧损部位，对应的下层线棒槽部直线部位也存在2处过热烧损部位，云母绝缘存在碳化现象，下层线棒表面绝

缘损伤较上层线棒严重。第一处距测温垫条下端约46 cm，损伤部位长24.5 cm；第二处距测温垫条下端约96 cm，损伤部位长62.5 cm。两处均为线棒层间部位，两处绝缘损伤部位间垫条、测温元件引线和金属屏蔽层（镁铝合金）均烧断，该层间垫条内的主备用测温元件本体完好。定子层间绝缘损伤情况如图1～图3所示。

图1 第一处烧损具体情况

图2 第二处烧损具体情况

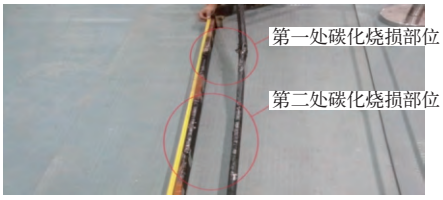

图3 178#上、下层线棒绝缘损伤部位全图

对烧损的测温垫条进行解剖分析，烧损处存在从内向外烧损现象，如图4所示。

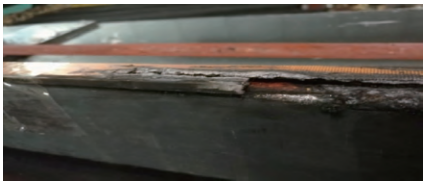

图4 从内向外烧损现象

拔出相邻的168#～192#槽线棒，检查位于181#槽、185#槽、186#槽、189#槽和190#槽的测温电阻及定子线棒情况，定子线棒未见损坏，一根测温垫条存在热鼓胀和烧蚀现象，如图5所示。

图5 测温垫条有热鼓胀和内部烧点图

3 原因分析

3.1 测温垫条内部环流发热损伤线棒

4F机组定子线棒烧损痕迹呈现出由测温垫条向定子线棒绝缘表面发展的状态，因此可判断此次故障的直接原因为测温垫条中主、备测温电阻屏蔽线接触点过热引起，测温电阻制造工艺存在缺陷。主备用测温电阻屏蔽层在封装时，每隔10 cm绑扎在一起，存在多点金属性接触，在定子铁心槽内交变磁场作用下形成环流和放电火花，产生的热量逐渐累积直至烧损测温电阻屏蔽层、引线及测温垫条本体，最终破坏线棒绝缘，引发线棒破压，导致定子接地故障发生。

垫条情况简介：长3 340 mm，宽23 mm，高5 mm。测温电阻安装在垫条内部，有布置在垫条上部、中部和下部三种方式。第178#槽测温电阻安装于垫条下部，距底部250 mm。测温电阻长150 mm，宽18 mm，高2.5 mm，如图6所示。

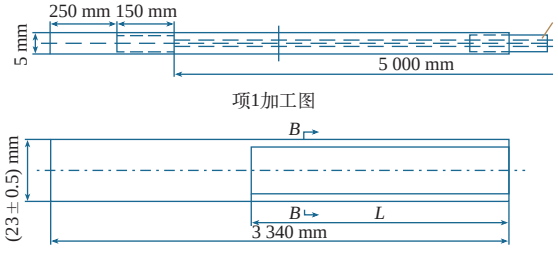

图6 4F机组垫条示意图

测温电阻安装方法为：在垫条上开槽，将测温电阻嵌入槽中再灌胶封装、打磨。开槽大小为：宽19 mm，高3.5 mm，如图7所示。

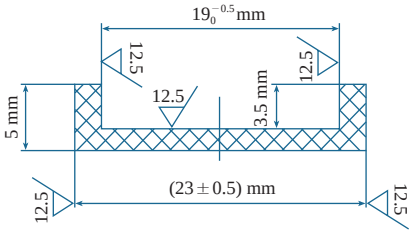

图7 垫条中开槽示意图

测温电阻引出线相关情况对比：4F机组定子绕组测温电阻引出线采用圆线电缆，线径为3.2 mm，剖面示意图如图8所示。由于槽高为3.5 mm，线径为3.2 mm，若直接灌胶封装，将不满足相关要求。

在垫条生产过程中，封装单位将测温电阻引出线外护套剥掉（线径变为2.2 mm左右），将两只电阻引出线放入槽中然后灌胶封装，剖面图如图9～图11所示。两根测温电阻引出线屏蔽层之间有的地方接通（直接绑扎在一起），有的地方未接通。

通过解剖4F机组定子测温垫条，发现垫条中主、备用测温电阻两组引出线屏蔽层间存在多点连通，定子槽内交变磁场在两个屏蔽线中交链，形成感应电动势，通过各接触点形成通路，进而产生感应电流，该感应电流将产生附加损耗。据电机厂家通过磁通量模拟初步计算，屏蔽线在垫

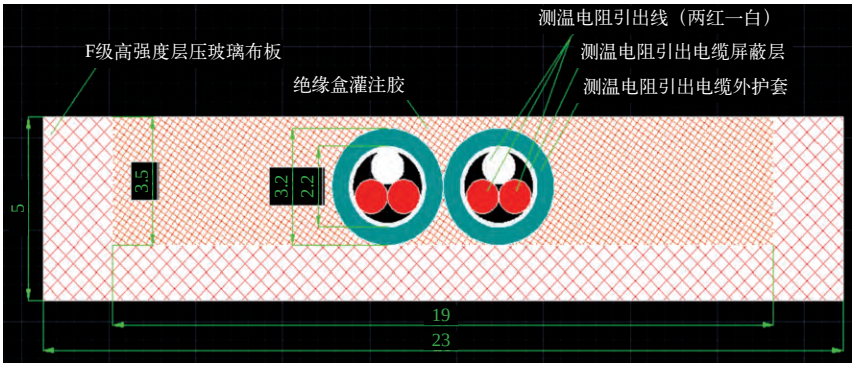

图8 线径为3.2 mm时安装示意图

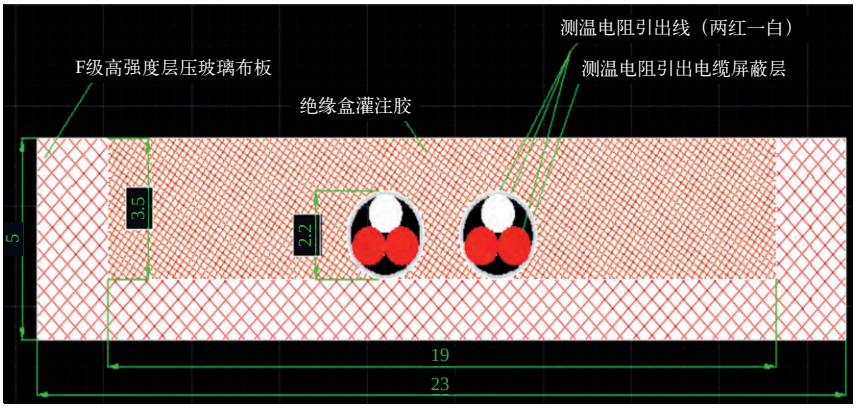

图9 4F机组垫条内测温电阻引出线剖面图（示意图）

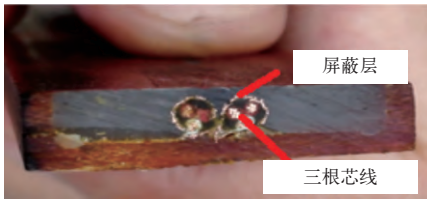

图10 4F机组垫条内测温电阻引出线剖面图（实物图）

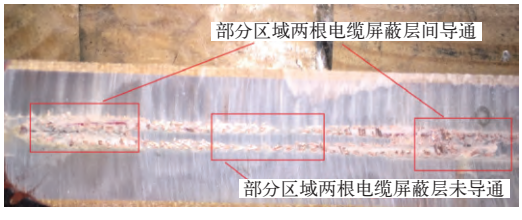

图11 4F机组垫条内测温电阻引出线屏蔽层间导通情况

条内部两端电压有效值256 V，最大值362 V，环流有效值1.2 A，最大值2.8 A。对于整个破坏过程，有以下两种可能情况，有可能是某一种情况，或者是两种情况叠加。

1）屏蔽线中两点连通环流产生的热量集中在测温垫条屏蔽接触点部位，由于测温垫条传热性能差，发热点热量累加，以及屏蔽层接触点局部烧断形成放电火花，造成测温垫条从内到外烧损碳化并导致两组测温电阻屏蔽层间短接点向外延伸，线棒绝缘层受热加速老化、碳化，绝缘强度降低，引发线棒绝缘破压，造成定子绕组接地故障。其原理如图12所示。咨询测温电阻厂家，测温线烧断的温度为1 000～1 200 ℃、垫条碳化温度为200～250 ℃；咨询电机厂家，放电火花温度约为1 300 ℃，线棒绝缘层温度达200 ℃老化时间约为5 h。

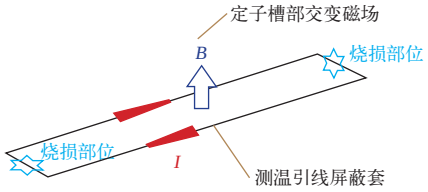

图12　测温引线的屏蔽线两点短路后环流示意图

2）因屏蔽线存在多点连通，在定子槽内形成内环流、外环流或多种组合环流，环流和放电所产生的发热可能集中在某一点上，当该点烧断就不再形成环流，又集中在下一个接触点上发热，直到再次烧断开路，或将线棒绝缘层受热加速老化，引发线棒绝缘破压，造成定子绕组接地故障。其原理如图13所示。

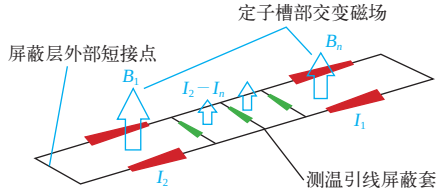

图13　测温引线的屏蔽线多点短路后环流示意图

3.2　测温电阻屏蔽线放电损伤线棒

4F机组定子绕组测温垫条在装配时，采取了去除引线外层绝缘护套以减小引线尺寸来满足装配要求，从而造成引线屏蔽铜网裸露，且部分屏蔽铜网处于垫条上层表面，形成了引线屏蔽铜网对线圈表面绝缘低阻层的放电通道。在机组运行过程中，埋于测温垫条内的测温元件引线屏蔽铜网在交流磁场中感应电动势（有效值256 V，最大值362 V），通过上述的放电通道对线棒表面绝缘低阻层放电，造成屏蔽铜网烧损、线棒绝缘烧损，随着时间推移，线棒主绝缘累积损坏，最后导致定子一点接地故障。放电示意图如图14所示。

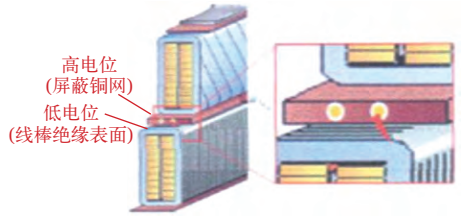

图14　放电示意图

3.3　垫条内测温电阻屏蔽线通过线棒表面绝缘低阻层接地形成电流

在机组运行过程中，埋于测温垫条内测温元件引线屏蔽铜网与线棒同样处于交变磁场中，屏蔽铜网在交流磁场中感应电动势。垫条内测温电阻屏蔽线通过线棒表面绝缘低阻层接地（在检测中存在不同阻值0～350 kΩ的接地），与外部测温电阻屏蔽线短接接地形成回路，屏蔽铜网在交流磁场中通过线棒表面绝缘低阻层形成环流，该环流在接触点（线棒表面绝缘低阻层）将产生热量损耗（I^2R），热量大小与线棒表面绝缘低阻层接地电阻相关，电阻小则电流大，发热较大。使封装层碳化和线棒绝缘层受热加速老化，绝缘强度降低，引发线棒绝缘破压，造成定子绕组接地故障。

4　建议及思考

1）建议测温电阻采用具有完好保护套的扁线[3-4]，便于测温垫条内灌胶封装。

2）对测温垫条结构进行分析，探讨测温元件开双槽的可能性，完善测温元件布线、封装工艺，保证测温元件引线槽内安装和布置。

3）充分考虑引线长度，直接接入端子箱，增

加引线保护套管，优化测温引线布置走线方式[5-8]。

4）定期对机组定子线圈测温引线开展检查工作，如部分测温电阻引线屏蔽层出现绝缘异常问题，可采取以下防范措施：①针对主备电阻屏蔽层之间存在短路现象如图15、图16所示，将主、备电阻屏蔽层分别与外部电缆屏蔽层断开悬空，并做好绝缘处理；②针对单个电阻屏蔽层存在接地现象如图17所示，将其中对地绝缘为零的屏蔽层与外部电缆屏蔽层断开悬空，并做好绝缘处理。

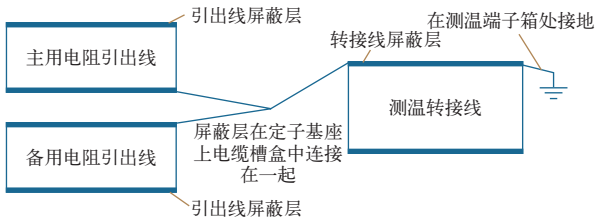

图15　主、备测温电阻无异常时屏蔽层连接示意图

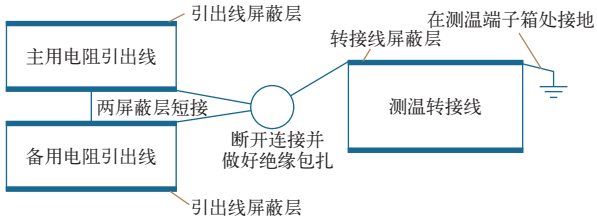

图16　主用与备用测温电阻屏蔽层短路时处理示意图

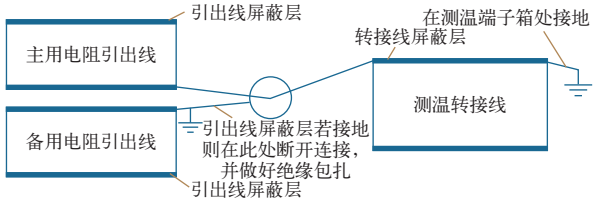

图17　主用或备用测温电阻屏蔽层接地时处理示意图
（图为备用电阻引出线屏蔽层接地时）

5）在设计和安装大型水轮发电机时对其细节应考虑周全，严格按照工艺要求施工，对所有测温元件入厂进行检验，封装、电阻试验等全过程进行现场监督。

参考文献

[1] 杨林，柳舜水，潘海峰，等．发电机测温元件烧毁的检查与处理方法 [J]．电机技术，2012 (12)：36-37．

[2] 仇明，吉日格图，张端阳，等．一起因测温元件故障导致发电机线棒绝缘烧损的案例 [J]．大电机技术，2009 (5)：24-26．

[3] 周廷虎，袁娟．提高水轮发电机组测温系统可靠性的技术措施 [J]．陕西电力，2010，38 (1)：80-82．

[4] 乐秀璠，张方军．大容量发电机定子接地保护改造过程的分析 [J]．电力自动化设备，2002，22 (12)：20-23．

[5] 万慧，吴济安，陆于平．新型数字式发电机定子接地保护的研究 [J]．电力自动化设备，2002，22 (11)：7-10．

[6] 何正友，戴小文，钱清泉．电力系统暂态信号的小波分析方法及其应用 (二) 电力系统暂态信号的小波分析方法探讨 [J]．电力系统及其自动化学报，2002，14 (5)：1-3．

[7] 何正友，杨卿，钱清泉．电力系统暂态信号的小波分析方法及其应用 (三) 基于小波分析的EHV输电线路单端量暂态保护 [J]．电力系统及其自动化学报，2002，14 (5)：4-6．

[8] 王怀智．300 MW发电机中性点采用消弧线圈补偿接地方式在大坝电厂的应用 [J]．继电器，2002，30 (9)：70-73．

（收稿日期：2017－02－07）EA

欢迎订阅　欢迎投稿　欢迎刊登广告